第 38 卷第 4 期　　工 程 热 物 理 学 报　　Vol.38, No.4
2017 年 4 月　　JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS　　Apr., 2017

二维 U 型弯管流动中湍流模型的性能研究

王　菁[1]　雍小松[1]　柳阳威[1,2]　陆利蓬[1,2]

(1. 北京航空航天大学能源与动力工程学院航空发动机气动热力国家级重点实验室，北京，100191；
2. 先进航空发动机协同创新中心，北京　100191)

摘　要　采用 FLUENT 中 8 个湍流模型以及曲率修正后的模型对 U 型弯管中的二维流动进行了模拟，详细对比了两个雷诺数 10^5 和 10^6 下速度、湍动能、湍流剪切应力、摩擦系数和静压力系数的实验和模拟结果。研究发现，当 $Re=10^5$，Realizable $k-\varepsilon$ 模型、Spalart-Allmaras 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型能准确模拟出流动分离的位置；当 Re=10^6，所有模型预测到的分离位置都滞后。曲率修正对 SKE 以外的湍流模型预测性能基本上没有改善;SKE 模型对曲率修正的影响最为敏感, 对速度、湍动能、内壁面处的摩擦系数的模拟结果都有一定的改善。

关键词　湍流模型；U 型弯管；数值模拟；曲率流动
中图分类号: TK05　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 0253–231X(2017)04–0710–09

Performance Study of the Turbulence Models in a Two-dimensional U-bend Duct

WANG Jing[1]　YONG Xiao-Song[1]　LIU Yang-Wei[1,2]　LU Li-Peng[1,2]

(1. *National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-Thermodynamics, School of Energy and power Engineering, Beihang University,* *Beijing* 100191, *China*
2. *Collaborative Innovation Center of Advanced Aero-Engine,* *Beijing* 100191, *China*)

Abstract　The flow in 2D of the u-bend is simulated, with eight common turbulence models and curvature correction model respectively. By comparing the simulation and experimental results of velocity, turbulence kinetic energy, turbulent shear stress, friction coefficient and static pressure coefficient under two kinds of Reynolds number 10^5 and 10^6, it is find that the Realizable $k-\varepsilon$ model, Spalart-Allmaras model and RNG $k-\varepsilon$ model have a good simulation results about the position of the flow separation when the Reynolds number is 10^5. Besides, the separation positions predicted by all models are lagging behind. The models with curvature correction are not better than before expect SKE. The model of SKE is more sensitive to the influence of curvature, and there is a greater improvement on simulation about velocity and turbulence kinetic energy.

Key words　turbulence models; U-bend; numerical simulation; curvature flow

0 引　言

航空发动机和燃气轮机 (简称 “两机”) 应用广泛，发展先进 “两机” 技术，对动力、节能、减排、降噪等都有重大意义。设计高性能 “两机”，离不开先进的 CFD 手段、目前，准确预测 “两机” 内的复杂流动 (如大尺度分离等) 对当前 CFD 提出了巨大的挑战。DNS、LES、hybrid LES/RANS 等高精度方法由于计算耗费太大而无法应用于日常工程设计，而工程广泛应用的 RANS 方法存在湍流模型模拟准确性的问题 [1]。

现有湍流模型主要分为两大类：一类是以 Boussinesq 涡黏性假设为基础的涡黏性模型；另一类是雷诺应力模型 (RSM)。尽管 RSM 模型能够模拟出一些局部典型复杂流动现象，但是由于仍然留有固有的物理不足，以及收敛性不好，较大的复杂性和计算量等多种原因，至今难以应用于航空发动机的研制。而涡黏湍流模型都是基于简单边界、平衡湍流、各向同性假设发展起来的。航空发动机中的流动非常复杂，存在着大分离流动和复杂涡系，常处于湍流非平衡、各向异性的状态，使得常用涡黏模型难以准确模拟。大曲率是航空发动机中流动复杂的主要影响因素之一，而常用涡黏湍流模型没有考虑曲率对流动的影响。在这种背景下，Spalart 和 Shur[2]

收稿日期：2017-01-11; **修订日期**：2017-03-19
基金项目：国家自然科学基金资助项目 (No.51676007, No.51420105008)；国家重点基础研究发展计划 (No.2014CB046405)
作者简介：王　菁 (1991–)，女，硕士生，主要从事弯管流动预测和控制研究。　**通信作者**：柳阳威，副教授，liuyangwei@126.com

提出了一种曲率修正方法，并有效提高了 Spalart-Allmaras 模型的精度。Smirnov 和 Menter[3] 把这一修正方法应用到了 SST k-ω 模型中，也有效提高了该模型的精度。但到目前为止，对大曲率流动中常用湍流模型性能的系统研究还较少，亟需进一步开展深入研究。

U 型弯管流动很好地体现了大曲率对流动的影响，因此成为了研究曲率影响的经典流动。其中 NASA 的 Monson 等 [4,5] 对 U 型弯管流动进行了详细的实验测量，提供了丰富的流场数据。本文针对该二维 U 型弯管流动，采用最常用的 8 个湍流模型对其进行数值模拟。8 种湍流模型分别是 Spalart-Allmaras 模型 [6] (SA)、Standard $k-\varepsilon$ 模型 [7](SKE)、Realizable $k-\varepsilon$ 模型 [8] (RKE)、RNG $k-\varepsilon$ 模型 [9](RNG KE)、Standard k-ω 模型 [10] (SKW)、SST $k-\omega$ 模型 [11,12](SST KW)、v2-f 模型 [13,14](V2F) 和雷诺应力模型 [15,16](RSM)。通过模拟结果与实验结果的对比，系统的分析各湍流模型对大曲率流动的预测能力。进一步采用带有曲率修正的 SA、SKE、RNG KE、RKE、SKW 和 SST KW 对该算例进行了模拟，分析曲率修正对湍流模型性能的影响。

1 二维 U 型弯管模型建立

1.1 二维 U 型弯管参数简介

本文模拟的二维 U 型弯管参数以及实验数据均来自 Monson 等 [4,17] 的实验，U 型管参数如图 1 所示。管高度 $H=3.81$ cm，入口段长度为 $10H=38.1$ cm，出口段长度为 $12H=45.72$ cm，弯管处内壁半径 $r_{\rm i}=1.91$ cm，外壁半径 $r_{\rm o}=5.72$ cm，s 为沿 U 型管中心线的自然坐标系，以入口段和弯管交界处为原点，入口段为负，弯管处和出口段为正。Y 轴的坐标值在内壁面处为零，且恒为正值，外壁面处最大值为 H，X 轴坐标值在入口段为负，出口段为正，弯管处采用极坐标，原点为内外壁面的圆心。作图时位置都用管径 H 做了无量纲化处理，速度都以入口速度 $U_{\rm ref}$ 为基准做了无量纲化处理。

1.2 实验数据

实验数据来源于 Monson 等 [4] 的实验，进口速度为 $U_{\rm ref}=32$ m/s ($Ma\approx 0.1$)，进口总压分别为 $P_{\rm t}=1.2P_0$ 和 12 P_0，P_0 为标准大气压，出口压力与进口压力一样，分别可以达到进口雷诺为 $Re=10^5$ 和 10^6，实验数据测量主要运用二维 LDV(激光多普勒测速) 技术测量了流动速度，此外还测量了 U 型管的表面摩擦力、湍动能、湍流切应力压力等参数，关于更多的数据测量细节可以参考 Monson 等 [4] 的工作。

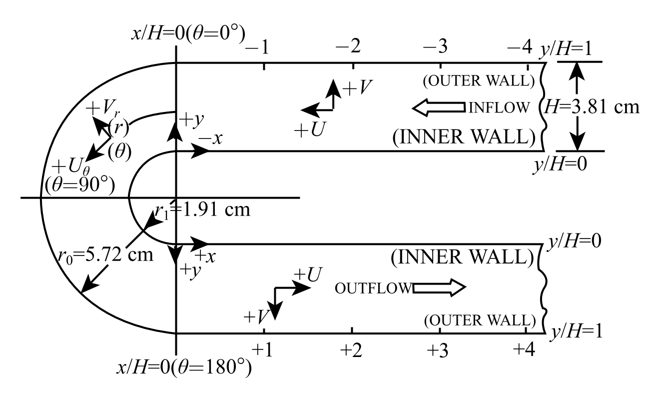


图 1　U 型弯管参数示意图 [4]

Fig. 1　The geometry of U-bend[4]

2 数值计算设置

2.1 网格的设置

为了减小网格对模拟结果的影响，根据各湍流模型对壁面网格的要求，在近壁面采用的增强壁面模型，近壁面网格 $y^+\approx 1$。同时本文通过调整网格分布以及网格数，采用了三套网格，如图 2 和表 1 所示，进行了网格无关性检验。通过模拟进口 $Re=10^5$ 条件下不同截面的速度分布曲线来对网格无关性进行分析。

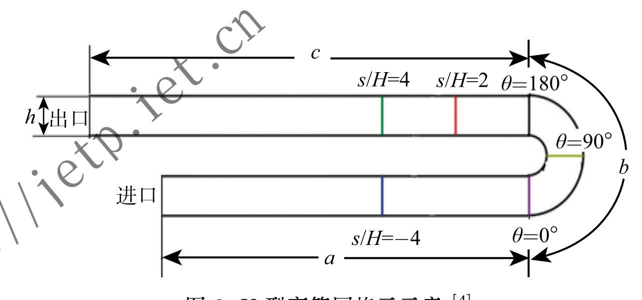


图 2　U 型弯管网格示示意 [4]

Fig. 2　The mesh of U-bend

表 1　网格节点分布情况

Table 1　The grid node distribution

节点数	a	b	c	h	网格总数
第一套	104	125	125	97	34388
第二套	125	150	150	117	49735
第三套	150	180	180	140	71400

三套网格均为 SKE 模型对进口 $Re=10^5$ 的二维 U 型弯管进行模拟。通过对 $s/H=-4$、$\theta=0°$、$\theta=90°$、$\theta=180°$、$s/H=2$、$s/H=4$ 以及出口位置的速度分布进行对比 (限于篇幅没有给出)，发现三套网格的模拟结果完全吻合，做到了网格无关

解。因此，本文采用第二套网格进行后期的数值模拟计算。

2.2 边界条件及湍流模型

根据实验文献 [4] 中提供的数据，选取上游处距离弯曲段进口 $4H$ 处的物理量作为进口条件。马赫数为 0.1 时静压与总压的比值 $\pi = 0.993$。雷诺数 $Re = 10^5$ 时，进口静压设置为 $P = 120787$ Pa；当雷诺数 $Re = 10^6$ 时，进口静压设置为 $P = 1207870$ Pa。出口设置为压力出口静压与进口静压相等。

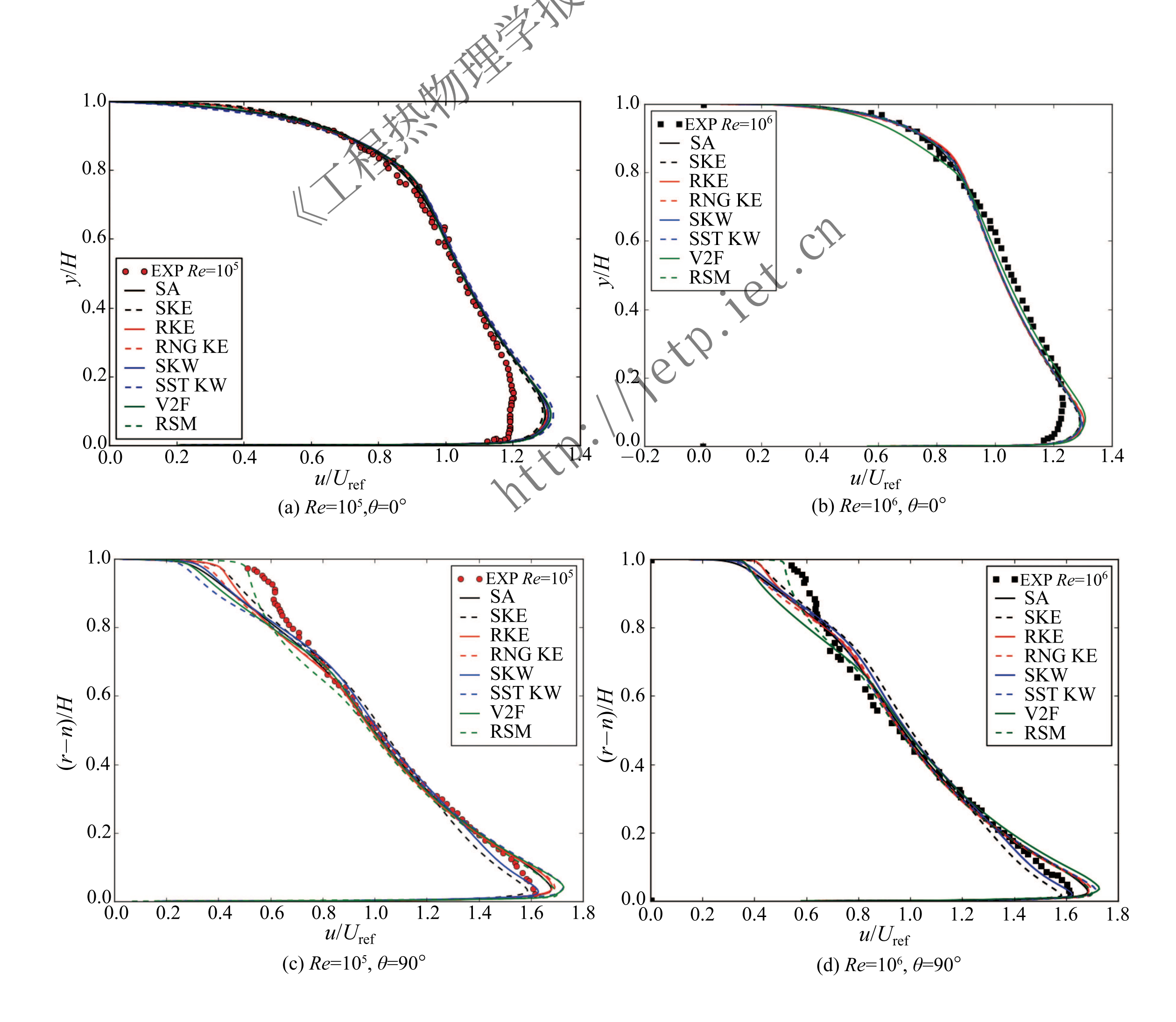
为了比较不同湍流模型对模拟结果的影响，在本文的研究中，采用 SA 模型、SKE 模型、RKE 模型、RNG KE 模型、SKW 模型、SSK KW 模型、V2F 模型和 RSM 模型 8 种常用的湍流模型对 U 型管内的流动进行了计算。SKE 模型、RKE 模型、RNG KE 模型和 RSM 模型在近壁区采用了增强壁面处理模型。为了研究曲率修正后的湍流模型的模拟性能，本文最后也对带曲率修正的 SA CC 模型、SKE CC 模型、RKE CC 模型、RNG KE CC 模型、SKW CC 模型和 SST KW CC 模型对流动进行了模拟。

3 常用湍流模型的模拟结果

3.1 速度模拟结果

从图 3 (a) 和图 3 (b) 中可以看到，由于曲率影响，0° 截面位置流速已经发生了偏移，由于气流流动中产生的离心力与径向压力梯度的不平衡，导致 U 型管中形成一个较大的低压区，从而使其流速增加，而外侧壁面由于较大离心力的作用，使外侧壁面处产生一个较大的高压区，使得外侧壁面处速度较低。在该截面处，所有模型在内侧壁面处的模拟结果都偏大，各湍流模型模拟结果相差不大。

在 90° 截面位置，内侧速度达到了最大值，外侧速度降为最低值，如图 3 (c) 和图 3 (d)。该截面处，内外侧壁面的模拟结果同实验结果有明显的差异。其中，RSM 模型在外侧壁面处的模拟结果模拟的最好，SKW 模型和 SST KW 模型在内侧壁面处的模拟结果同实验吻合的最好。整体来说，RSM 模型模拟的结果同实验最为接近。



(a) Re=10^5,θ=0°

(b) Re=10^6, θ=0°

(c) Re=10^5, θ=90°

(d) Re=10^6, θ=90°

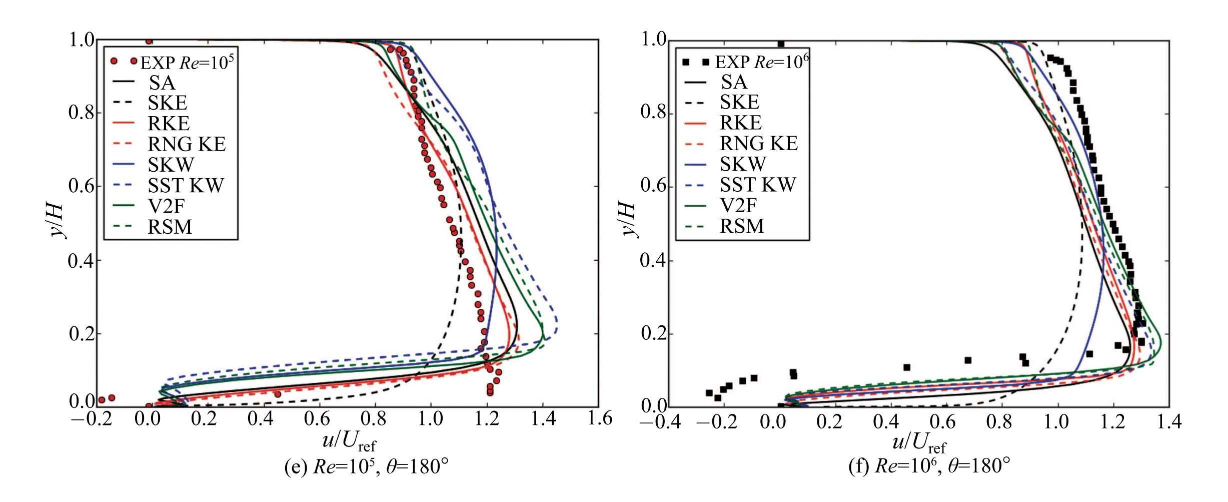


图 3　弯曲段各截面的速度分布曲线

Fig. 3　The cross section of velocity distribution

在 180° 截面位置，各湍流模型模拟结果差异较大，如图 3 (e) 和图 3 (f)。当 $Re=10^5$, RKE 模型的模拟结果与实验结果最接近，而当 $Re=10^6$，RSM 模型与实验结果最为接近。

从图 3 可以看到，相比 $Re=10^5$，各湍流模型在 $Re=10^6$ 时的模拟结果与实验结果更加吻合。

为了更好的分析模拟结果与实验结果间的差异性，本文对 $Re=10^6$ 流动下，90° 截面位置的湍动能的分布情况进行了进一步研究。如图 4 所示，该截面在外侧壁面附近湍动能的实验结果出现了峰值，各湍流模型的模拟结果偏小。结合图 3 (c) 和图 3 (d) 中该截面的速度分布情况，外侧壁面处速度模拟结果偏小可能是由于该处湍动能模拟结果不准确造成的。在内侧壁面处，SKW 和 SST KW 模型出现了峰值，这与实验结果偏差较大。整体来看，对于湍动能的模拟结果，RSM 模型模拟结果更加吻合。

图 5 显示了雷诺数 $Re=10^5$ 和 $Re=10^6$ 时，在下游 $s/H=2$、$s/H=4$ 和出口截面处流速分布的模拟情况。图 5 显示，相对于弯曲段，在下游直管段不同湍流模型间的模拟结果差异性较大，各湍流模型模拟结果与实验结果相差较大。从图 5 中可以看到，在内侧壁面处各模型模拟结果都偏小，随着流动向下游发展，这种偏差在逐渐减小，如图 5 (e) 和图 5 (f)，在出口内侧壁面处模拟结果与实验结果的偏差较小。从图 5 (c) 和图 5 (d) 可以看到，与实验结果相比，模拟结果得到了一个较薄的边界层，而在出口处，如图 5 (e) 和图 5 (f)，当流动逐渐从曲率影响中恢复时，湍流模型预测的结果恢复的较慢。

为了进一步分析下游的直管流动情况，图 6 和图 7 中给出了雷诺数 $Re=10^6$ 时，在 $s/H=2$ 和出口截面位置的湍动能模拟结果。从图 6 中可以看到，在 $s/H=2$ 截面，内侧壁面附近模拟的湍动能峰值均比实验值偏小，而在弯管中心靠近外侧壁面附近出现了湍动能平台区，与实验结果有所偏差。

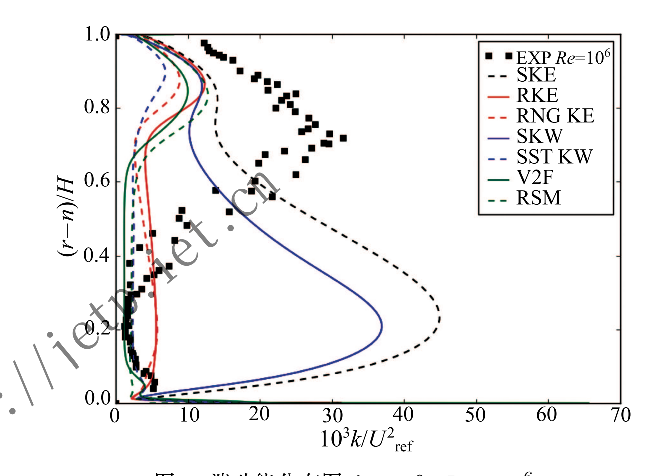


图 4　湍动能分布图 $\theta=90°$，$Re=10^6$

Fig. 4　Turbulent kinetic energy distribution $\theta=90°$，$Re=10^6$

结合图 5 (a) 和图 5 (b)，在相同位置出现了速度平台以及在内侧壁面处模拟结果偏小，可能是由于各湍流模型对湍动能的模拟结果不准确导致的。其中 SKE 模型的模拟结果偏差最大，而 RSM 模型模拟结果吻合较好。从图 7 中出口湍动能实验结果显示，湍动能已逐渐恢复平稳，而各模型的湍动能模拟结果仍然有较大的波动，因此从另一个角度也说明湍流模型预测的流动从曲率影响中恢复比实验结果更晚一些。

(a) Re=10^5, S/H=2

(b) Re=10^6, S/H=2

(c) Re=10^5, S/H=4

(d) Re=10^6, S/H=4

(e) Re=10^5, 出口

(f) Re=10^6, 出口

图 5 下游直管段各截面速度分布图

Fig. 5 The velocity profiles of the downstream sections

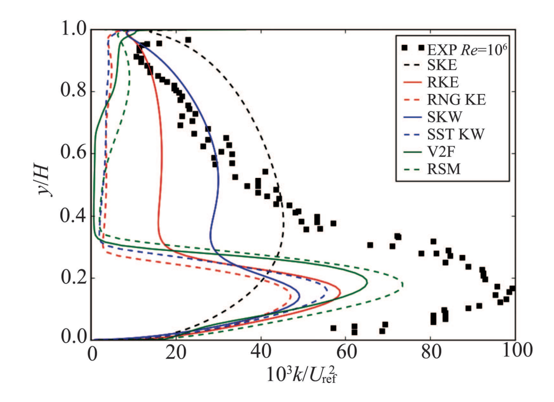


图 6 $s/H = 2$ 处湍动能分布 $Re = 10^6$

Fig. 6 Turbulent kinetic energy distribution $s/H = 2$, $Re = 10^6$

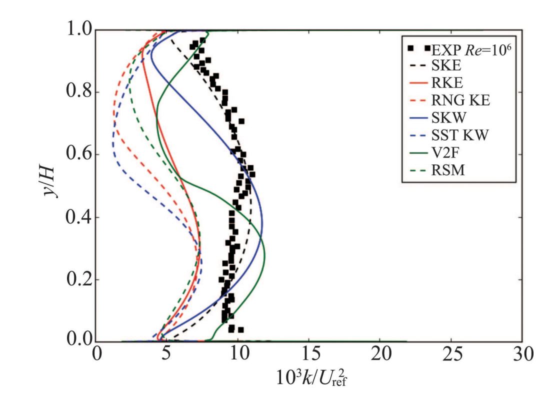


图 7 出口处湍动能分布 $Re = 10^6$

Fig. 7 Turbulent kinetic energy distribution Outlet, $Re = 10^6$

3.2 分离区的模拟结果

根据 Sandborn[18] 的弯管实验可以发现，在雷诺数 $Re=10^5$ 时，分离位置在 170° 左右，分离区平均最大高度为 0.04 H，分离再附的位置在下游 0.5 H~1H 的位置处。在雷诺数 $Re=10^6$ 时，通过实验发现，分离位置在 150° 位置，分离区平均最大高度为 0.14 H，分离再附的位置在下游 1 H ~1.5 H 的位置处。

表 2 和表 3 显示了两种流动条件下，各湍流模型对流动分离的模拟情况。

表 2　$Re=10^5$ 时，分离位置统计情况

Table 2　The separation position statistics, $Re=10^5$

模型/实验	分离位置/(°)	再附位置	竖直高度
实验	170	$0.5H\sim1.5H$	$0.04H\sim0.16H$
SA	160	$1.67H$	$0.016H$
SKE	无	无	无
RKE	160	$1.23H$	$0.11H$
RNG KE	162	$1.15H$	$0.08H$
SKW	145	$1.71H$	$0.19H$
SST KW	140	$1.98H$	$0.24H$
V2F	155	$2H$	$0.2H$
RSM	128	$1.25H$	$0.18H$

表 3　$Re=10^6$ 时，分离位置统计情况

Table 3　The separation position statistics, $Re=10^6$

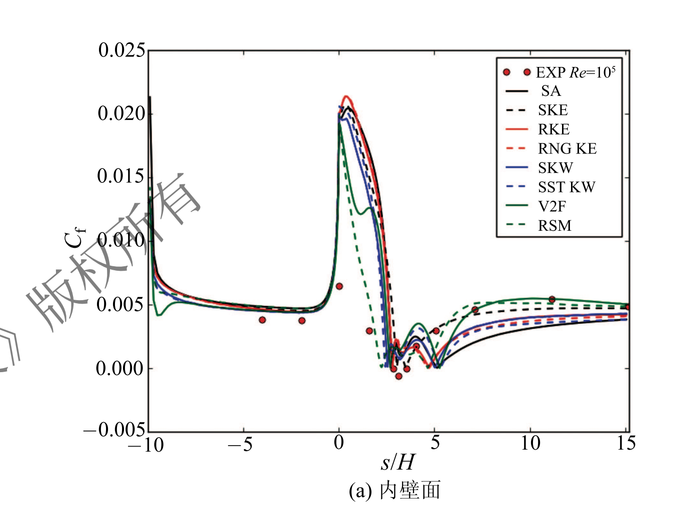
模型/实验	分离位置/(°)	再附位置	竖直高度
实验	150	$1.0H\sim1.5H$	$0.14H\sim0.23H$
SA	171	$1.4H$	$0.09H$
SKE	无	无	无
RKE	160	$1.36H$	$0.14H$
RNG KE	165	$1.26H$	$0.12H$
SKW	164	$1.2H$	$0.13H$
SST KW	162	$1.47H$	$0.16H$
V2F	166	$1.52H$	$0.17H$
RSM	162	$1.17H$	$0.16H$

从表 2 中，可以看到当 $Re=10^5$ 时，SKE 模型模拟结果是最差的，没有模拟到流动的分离情况。RKE 模型和 RNG KE 模型对分离点位置模拟最接近实验分离点，而 RSM 模型的分离位置要明显比实验结果提前。而对于再附位置，SKW 模型、SST KW 模型和 V2F 模型比实验结果推迟了很多，这些模型对分离涡高度的模拟结果也偏大。整体来看，SKW 模型和 SST KW 模拟到的分离区更大一些。各模型模拟分离位置点都比实验结果靠前，再附位置比实验结果推后，分离区平均最大高度也较大，因此对于分离涡的大小，整体模拟结果比实验结果要大。

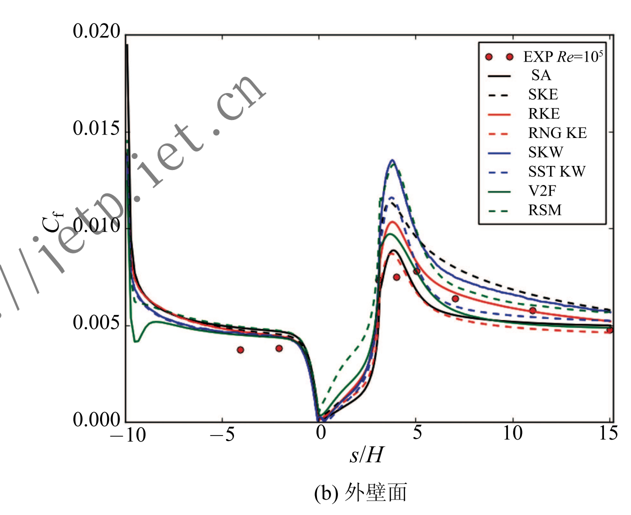
当 $Re=10^6$ 时，如表 3 所示，各模型对分离位置的模拟结果都比实验结果推后，其中 SA 模型偏差最大。对比表 2 和表 3，各湍流模型在较高的雷诺数时，对分离涡的模拟更加准确，而 SKE 模型在两种流动条件下，模拟结果均最差，没有模拟到分离流动的存在。整体来看，当雷诺数较高时，RSM 模型和 RNG KE 模型对分离的预测能力较好。

3.3 表面摩擦系数和壁面静压力系数的模拟结果

图 8 和图 9 中显示了两种流动情况下，内外侧壁面的摩擦系数绝对值曲线。



(a) 内壁面



(b) 外壁面

图 8　内外壁面的摩擦系数绝对值分布 $Re=10^5$

Fig. 8　The wall friction coefficient absolute value distribution of inner wall and outer wall, $Re=10^5$

当流动接近弯曲段时，内侧壁面流体加速，摩擦系数 C_f 急剧增加。在 $Re=10^5$ 时，各湍流模型模拟到弯曲段的内侧壁面的摩擦系数峰值明显偏大，如图 8 (a)。而在 $Re=10^6$ 时，该处的模拟结果有所改善，如图 9 (a)。在弯曲段后部，流动减速，C_f 快速降低，发生分离，出现了零值点。从图 8 (a) 中也可

以看到，在 $Re = 10^5$ 时，各湍流模型预测的再附点都比实验结果推后，导致下游摩擦系数偏小。而在 $Re = 10^6$ 时，各模拟结果模拟到的再附点同实验结果吻合较好，如图 9 (a)。

(a) 外壁面

(b) 外壁面

图 9 内外壁面的摩擦系数绝对值分布 $Re = 10^6$

Fig. 9 The wall friction coefficient absolute value distribution of inner wall and outer wall, $Re = 10^6$

除了摩擦系数 C_f 以外，壁面静压力系数 C_p 在工程中也是非常重要的参数。图 10 和图 11 显示了各湍流模型的壁面静压力系数 C_p 绝对值的模拟结果。

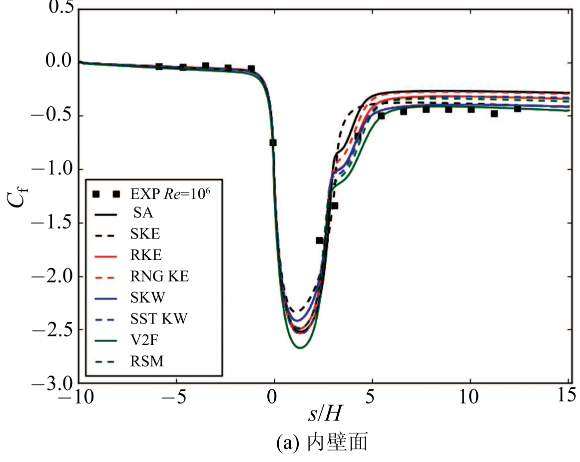
同摩擦系数相反的，如图 10 (a) 和图 11(a) 所示，C_p 在弯曲段内侧壁面，流速增加，压力降低，静压系数达到最低的峰值，随着流速的下降，压力降到最低值后，急剧上升，产生很大的径向压力梯度，导致流动分离，最终曲线逐渐恢复至平线。由于在此过程中，有流动损失形成，因此下游的静压力系数值要低于进口段的值。同时，从图 10 以看到，在分离区之前，各湍流模型对压力系数的模拟结果差异性很小，而且同实验吻合程度较大，而当流动分离后，各湍流型对流动模拟有明显的不同。在下游分离后，各湍流模型模拟结果都比实验偏大。整体来看，RSM 模拟结果相对较好。

(a) 内壁面

(b) 外壁面

图 10 外壁面的压力系数绝对值分布 $Re = 10^5$

Fig. 10 The wall pressure coefficient absolute value distribution of inner wall and outer wall, $Re = 10^5$



(a) 内壁面

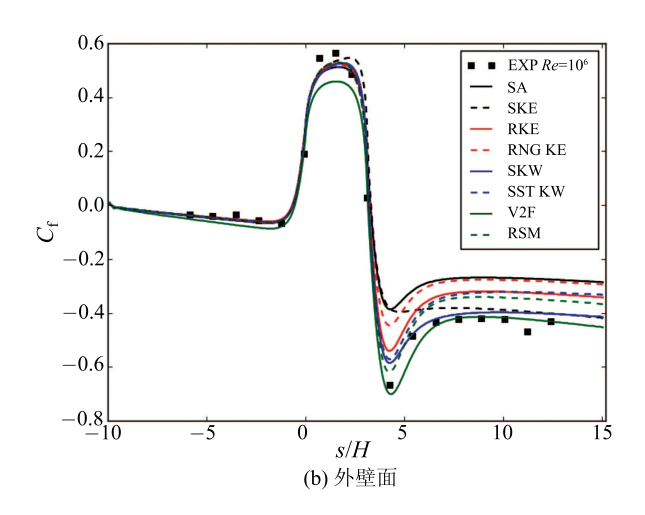


图 11　外壁面的压力系数绝对值分布 $Re=10^6$

Fig. 11　he wall pressure coefficient absolute value distribution of inner wall and outer wall, $Re=10^6$

4 带曲率修正的湍流模型的模拟结果

针对常用的湍流模型没有考虑曲率对流场的影响，一些学者提出了湍流模型基于曲率的修正方法，在 Fluent 中提供了基于曲率修正的 6 种湍流模型，分别是 SA CC，SKE CC，RNG KE CC，RKE CC，SKW CC 和 SST KW CC，下文将用这 6 种曲率修正后的湍流模型对 $Re=10^6$ 时的流动进行模拟计算，评估其模拟性能。

从图 12 可以看到，相对于原湍流模型，带曲率修正后的 SKE 模型在内侧壁面处实验更加吻合，而其他曲率修正后的模型在内侧壁面模拟性能反而变差，但在外侧壁面附近速度值有所增加，同实验值吻合较好；整体来看，对于速度分布模拟结果，曲率修正后的 SKE 湍流模型比原模型的模拟性能略好一些。而对于另外 5 个湍流模型，曲率修正对预测性能基本上没有改善甚至个别湍流模型还有一些恶化 (限于篇幅没有给出)。也就是说，本文所采用的曲率修正方法，对于这种 U 型弯管流动，未能很好考虑其中的湍流非平衡输运机理和各向异性机理，没能对预测性能带来本质的改善，还需要进一步开展深入研究。

为了进一步探究曲率修正对湍流模型模拟性能的影响，还对比了实验测量截面处的湍动能分布情况 (限于篇幅未全部给出)。其中，图 13 给出了在 90° 截面处 SKE 模型采用曲率修正前后的对比情况。修正后的 SKE 湍流模型对湍动能的模拟性能有很大的改善，在内侧壁面处的湍动能峰值基本消失了，而在外侧壁面处的峰值有所增加，这与实验结果趋势相吻合。同时也说明曲率是造成该种湍动能峰值出现的最主要的原因。而对于另外 5 个湍流模型，曲率修正使得这一位置的湍动能分布有一点改善，对 SKW 模型影响稍大一些，对于另外 4 个影响很小。总体来说，和预测的速度分布类似，曲率修正对 SKE 的性能影响最为明显。

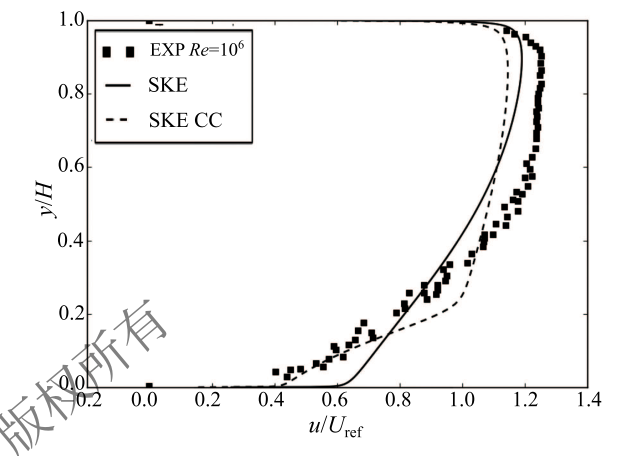


图 12　KE 和 SKE CC 在 $s/H=2$ 截面的速度分布曲线，$Re=10^6$

Fig. 12　The velocity distribution with SKE and SKE CC turbulence models, $s/H=2$, $Re=10^6$

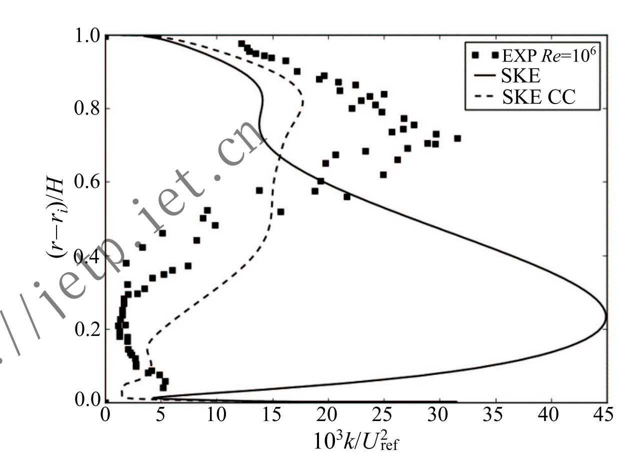


图 13　SKE 和 SKE CC 模型在 90° 截面的湍动能分布曲线，$Re=10^6$

Fig. 13　The velocity distribution with different turbulence models, $\theta=90°$, $Re=10^6$

与对速度和湍动能的模拟结果影响类似，曲率修正对内壁面处的摩擦系数的模拟结果，也是 SKE 模型的改进最为明显 (如图 14 所示，其余模型结果限于篇幅未给出)。带修正后的模型模拟到再附点的位置会比实验值推后，使得下游直管段的模拟结果偏小。对于内壁面的静压力系数，其影响结果与摩擦系数类似，这里就不再赘述。综合以上对比，表明 SKE 模型对曲率修正最为敏感。

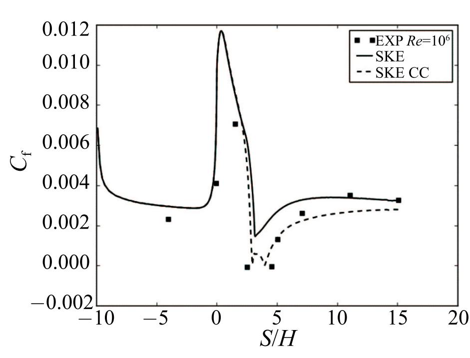


图 14 SKE 和 SKE CC 模型内壁面的摩擦系数绝对值分布，$Re = 10^6$

Fig. 14 The wall friction coefficient absolute value distribution of inner wall, $Re = 10^6$

5 结 论

本文针对二维 U 型弯管内的流动，研究了常用的 8 中湍流模型对弯管流动的模拟性能，系统分析了常用涡黏湍流模型对弯管流动的模拟能力，同时用带曲率修正的湍流模型对流动进行模拟，通过对比，分析了曲率修正对模型性能的影响作用。得到了以下几点结论：

1) 从速度分布曲线的模拟结果来看，相对于弯曲段，在下游直管段不同湍流模型间的模拟结果差异性较大。各湍流模型预测流动从曲率影响中恢复的速度比实验结果慢。相比 $Re = 10^5$，各湍流模型在 $Re = 10^6$ 时对速度分布的模拟结果与实验结果更加吻合。

2) 各湍流模型对分离涡大小模拟结果偏小。SKE 没有模拟到分离流动的存在，模拟效果最差。整体来看，当雷诺数较高时，RSM 模型和 RNG KE 模型对分离的预测能力较好。

3) 从湍动能分布和湍流剪切应力分布的模拟结果来看，RSM 模型比其他模型好。同时，对于摩擦系数和静压力系数的模拟结果，RSM 模型模拟的结果也与实验最为吻合。

4) 曲率修正对 SKE 以外的湍流模型预测性能基本上没有改善，SKE 模型对曲率修正的影响最为敏感。相对来说，修正后的 SKE 模型对于速度、湍动能、内壁面处的摩擦系数的模拟结果都有一定的改善，但仍有不小的偏差。

综上，现有湍流模型无法准确模拟 U 型管流动，采用 Spalart 和 Shur 提出的曲率修正方法，也不能很好的计入大曲率流动中的湍流非平衡输运特性和各向异性，针对大曲率流动的湍流机理和湍流模型改进工作还需要进一步开展。

参 考 文 献

[1] Spalart P R. Philosophies and Fallacies in Turbulence Modeling [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2015, 74: 1–15

[2] Spalart P R, Shur M. On the Sensitization of Turbulence Models to Rotation and Curvature [J]. Aerospace Science and Technology, 1997, 1(5): 297–302

[3] Smirnov P E, Menter F R. Sensitization of the SST Turbulence Model to Rotation and Curvature by Applying the Spalart-Shur Correction Term [J]. Journal of Turbomachinery, 2009, 131(4): 041010

[4] Monson D J, Seegmiller H L, McConnaughey P K. Comparison of LDV Measurements and Navier-Stokes Solutions in a Two-dimensional 180-degree Turn-around Duct [R]. AIAA-89-0275, 1989

[5] Monson D J, Seegmiller H L, McConnaughey P K. Comparison of Experiment with Calculations Using Curvature-Corrected Zero and Two Equation Turbulence Models for a Two-Dimensional U-duct [C]//AIAA, Fluid Dynamics, 21st Plasma Dynamics and Lasers Conference, 21st, Seattle, WA, 1990

[6] Menter F R. Two-eEquation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598–1605

[7] FLUENT 6.1 User Guide, (2001). Fluent Inc., Lebanon, USA. http://www.fluent.com

[8] Launder B E, Spalding D B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence [M]. London: Academic Press, 1972

[9] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A New k-ϵ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows [J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227–238

[10] Yakhot V, Orszag S A. Renormalization-Group Analysis of Turbulence [J]. Physical Review Letters, 1986, 57(14): 1722

[11] Launder B E, Reece G J, Rodi W. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 68(03): 537–566

[12] Launder B E, Shima N. Second-Moment Closure for the Near-Wall Sublayer-Development and Application [J]. AIAA Journal, 1989, 27(10): 1319–1325

[13] Menter F R, Kuntz M, Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model [J]. Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2003, 4(1): 625–632

[14] Durbin P A. Near-Wall Turbulence Closure Modeling Without “Damping Functions” [J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 1991, 3(1): 1–13

[15] Wilcox D C. Turbulence Modeling for CFD [M]. Canada, CA: DCW Industries, 1998: 103–217

[16] Gibson M M, Launder B E. Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1978, 86(03): 491–511

[17] Shur M L, Strelets M K, Travin A K, et al. Turbulence Modeling in Rotating and Curved Channels: Assessing the Spalart-Shur Correction [J]. AIAA Journal, 2000, 38(5): 784–792

[18] Sandborn V A. Measurement of Turbulent Flow Quantities in a Rectangular Duct with a 180 Degree Bend [C]//NASA Conference Pub, 1988: 10–12